

耦合增强型“巨”字形左手材料磁谐振器的设计

王甲富¹, 屈绍波^{1,2}, 徐卓², 马华¹, 杨一鸣¹, 顾超¹

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 西安交通大学 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:磁谐振器与电谐振器组合能够实现同时具有负介电常数和负磁导率的左手材料,左手材料磁谐振器的设计对于设计新型左手材料具有重要的意义。针对左手材料磁谐振器设计问题,提出了磁谐振器设计原理,为消除磁谐振器的双各向异性,所设计的结构关于电场方向等效为镜像对称的单回路。根据此原理,设计了耦合增强型“巨”字形磁谐振器结构,并通过实验仿真验证了结构的等效负磁导率。结果表明,所设计的结构在8.9GHz-10GHz之间具有负的等效磁导率,并且结构的双各项异性得到了有效的消除,说明了所提出设计原理的正确性。相对于传统的开口谐振环磁谐振器,“巨”字形磁谐振器结构简单,易于进行加工制作和理论分析。

关键词:耦合增强;左手材料;磁谐振器

中图分类号: O441.6;O482.5;O469 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)04-0079-04

1968年,前苏联科学家 V. G. Veselago^[1]对电磁波在介电常数和磁导率同时为负的媒质中的传播特点作了理论研究,但由于自然界中不存在着这种双负媒质,他的研究成果没有受到重视。1999年,英国皇家学院的 J. B. Pendry 等人^[2]提出用开口谐振环(Split-Ring Resonator)来实现负的磁导率,用金属导线来实现负介电常数,从而可以实现同时为负的介电常数和磁导率。D. R. Smith 等人^[3]根据 J. B. Pendry 提出的理论模型,制作出了开口谐振环与导线阵列构成的左手材料结构,并通过棱镜实验验证了这种结构的负折射系数,第一次实现了同时具有负磁导率和负介电常数的左手材料结构,在学术界掀起了左手材料研究的热潮。

实现左手材料的一个主要途径是将具有负磁导率和负介电常数的结构组合^[2-5],通常采用磁谐振器来实现负磁导率,采用金属导线和电谐振器来实现负介电常数,这需要进行磁谐振器(magnetic resonators)的研究^[6-8]和电谐振器(electric resonator)的研究^[9-10]。最早的左手材料磁谐振器是 J. B. Pendry 等人^[2]提出的开口谐振环,这种结构既具有磁谐振又具有电谐振,且两种谐振频率的间隔较为接近^[7]。当组成阵列时,电磁耦合效应会削弱开口谐振环的磁谐振,这不利于对开口谐振环磁谐振的应用。R. Marques 等人^[6]深入研究了开口谐振环的极化率,并提出了可以避免双各向异性的 BC-SRR(Broad-side Coupled Split-Ring Resonator),但是,由于 BC-SRR 要求在基板两面都要刻蚀结构,并且要求两面的结构完全对应,从而导致加工上的困难。

目前,对于左手材料磁谐振器的研究,主要集中于对 SRR 的研究及改进,而对于磁谐振器设计的一般原理和新结构设计的研究比较少。本文正是针对这一问题,提出了磁谐振器设计原理,并根据此原理设计了耦合增强型“巨”字形磁谐振结构,并通过实验仿真验证了结构的等效负磁导率。本文所提出的设计原理及新结构对于设计新型左手材料结构具有重要的指导意义和借鉴意义。

收稿日期:2008-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10474077, 50632030);陕西省基础研究计划资助项目(2005E,15);国家“973”计划资助项目(2002CB613307)

作者简介:王甲富(1981-),男,山东聊城人,博士生,主要从事左手材料的研究;E-mail: haomeijuan@126.com
屈绍波(1965-),男,安徽亳县人,教授,博士生导师,主要从事左手材料及超材料研究;
徐卓(1959-),男,四川成都人,教授,博士生导师,主要从事电子材料和材料物理的研究。

1 磁谐振器的设计原理

用磁谐振器结构实现负磁导率的原理是:当电磁波入射到结构上时,由于电磁感应,磁场会在结构上感应出电流。由于结构既具有电容性元件又具有电感性元件,由此就形成了L-C谐振回路,在谐振负区域就会出现负的等效磁导率。为抑制磁谐振器结构的双各向异性^[6],结构的等效回路必须等效为镜像对称的单回路,或者通过组阵使相邻结构单元之间形成镜像对称性,此原理称为单回路镜像对称设计原理。

在设计磁谐振器结构时,应该注意结构的单回路镜像对称性。图1为根据单回路镜像对称原理设计的“巨”字形磁谐振结构(图1(a))及其等效电路示意图(图1(b))。此结构采用的基板为Rogers公司生产的RT/duroid 5870 板材(相对介电常数 $\epsilon_r = 2.33$),基板的厚度 $t = 0.381$ mm,边长 $a = 3.33$ mm。基板上刻有“巨”字形铜线,铜线的线宽 $w = 0.2$ mm,铜线间的间距为 $d = 0.1$ mm,开口宽度 $c = 0.2$ mm,铜线长度 $b = 2.9$ mm。图1(b)为此结构的等效电路图,图中 C_0 为外铜线与内铜线之间的电容, L 为等效电感, R 为等效电阻。由图1(b)可知,此结构单元的等效电路图在 y 方向具有镜像对称性,而在 x 方向不具有镜像对称性,所以此结构同开口谐振环一样,也存在着双各向异性。当电磁波沿 x 方向入射且电场沿 y 方向时,由于 y 方向的镜像对称性,此结构只具有磁响应,不具有电响应;当电磁波沿 y 方向入射且电场沿 x 方向时,由于 x 方向不具有镜像对称性,此结构既具有磁响应,也具有电响应。

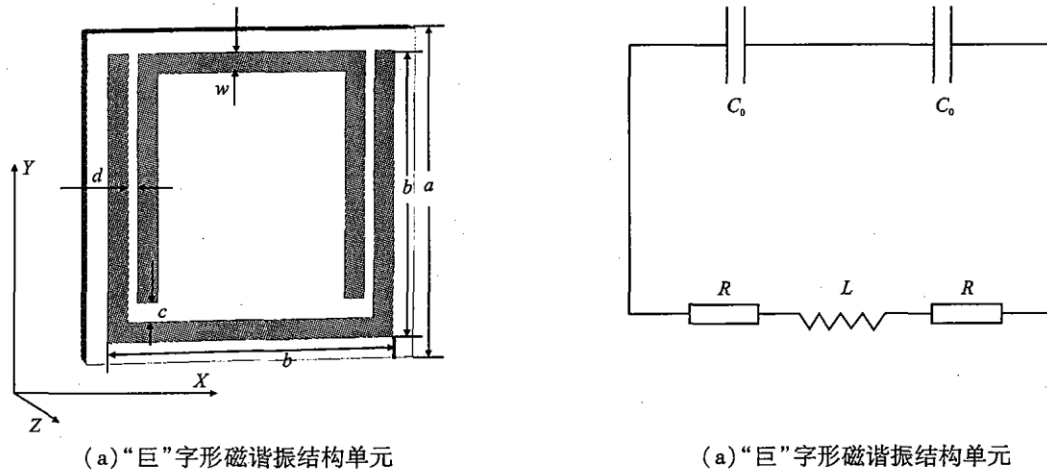


图1 “巨”字形磁谐振结构单元及其等效电路

Fig. 1 Structure and equivalent circuit of the coupling-enhanced unit cell

由于结构的电响应会影响结构的磁响应,所以应该采取措施尽量消除这种电响应。在构成左手材料时,通常要把谐振器组阵排列为周期阵列,有些排列方式会增强这种电响应而削弱了磁响应,这些排列是不可取的。相反,有些排列方式则可以消除或削弱电响应,增强磁响应。由于“巨”字形结构单元在 x 方向不具有镜像对称性,所以可以通过周期排列构成这种对称性,通过结构单元之间的耦合增强其磁响应。图2为耦合增强型“巨”字形磁谐振结构阵列,如图所示,通过单元之间的耦合构成了 x 方向的镜像对称,从而这种排列方式可以增强整个结构的磁响应。

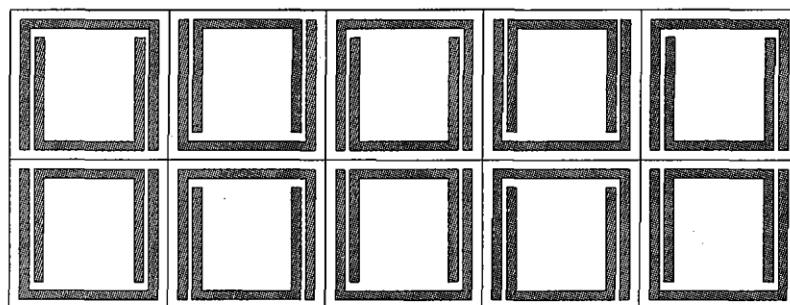


图2 耦合增强型“巨”字形磁谐振结构阵列

Fig. 2 Arrays of the coupling-enhanced magnetic resonators

2 耦合增强型“巨”字形磁谐振器的本构参数

对图1中的结构,采用商业计算软件 CST(Computer Simulation Technology) Microwave Studio 对其进行实验仿真。TEM 波从模型的左端入射,电场沿 y 方向,磁场沿着 z 方向。 y 方向的两个边界设置为理想电边界 ($E_t = 0$), z 方向的两个边界设置为理想磁边界 ($H_t = 0$), 即整个结构在 x 方向和 y 方向为无限大。结构在 y 方向和 z 方向的重复周期为 $a = 3.33$ mm。

为验证所设计结构的正确性,由仿真得到了“巨”字形结构单元的散射参数,即 S 参数。通过参数提取方法^[11-13],可由 S 参数提取得到结构的等效磁导率、等效介电常数、阻抗以及结构的折射率。图3给出了根据仿真得到的 S 参数所提取的等效磁导率、等效介电常数、阻抗以及结构单元的折射率。由图3(a)、(b)可知,由于磁谐振,结构单元的等效磁导率在 8.9GHz - 10GHz 之间出现负值,相应地,在此区域,结构单元的等效介电常数发生了反谐振(anti-resonance)^[14]。图3(c)、(d)分别给出了结构单元的阻抗和折射率。由图4(d)可知,在 9.2GHz - 10GHz 的频率区域,结构的折射率为零。这是因为在此频率区域内,结构的等效磁导率为负,而等效介电常数为正,电磁波不能够入射到结构内部而发生全反射。

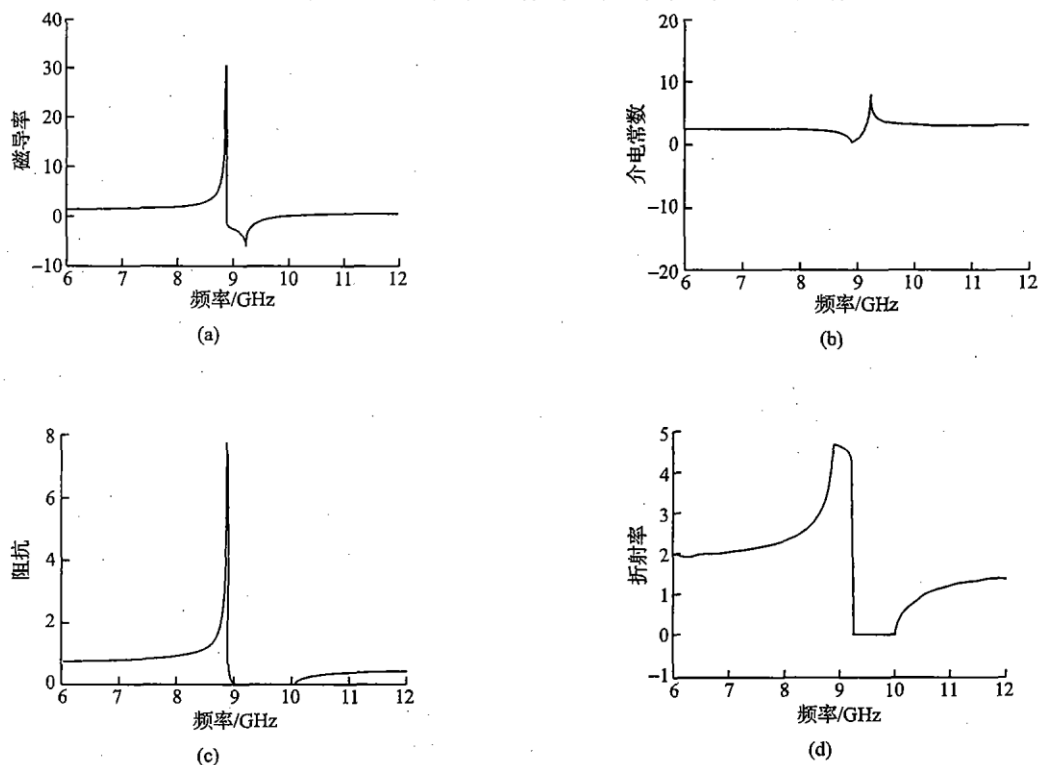


图3 “巨”字形结构阵列的、等效磁导率、等效介电常数、阻抗、折射率

Fig. 3 Effective permeability permittivity relative impedance and refractive index of the array

由仿真图形可以看到,耦合增强型“巨”字形磁谐振器结构可以很好地在微波波段实现负的磁导率,并且通过组阵可以很好地消除双各向异性。此外,耦合增强型“巨”字形磁谐振器结构单元结构简单,易于进行加工制作和理论分析。

3 结论

左手材料磁谐振结构的双各向异性对于设计左手材料是不利的,为了抑制这种双各向异性,消除干扰磁响应的电响应,可以通过组阵构成结构单元之间的镜像对称,通过单元之间的耦合增强整个结构的磁响应。通过实验仿真得到的 S 参数可以提取结构单元的等效磁导率、介电常数、阻抗和折射率,通过这些参数,可以很直观地确定结构产生负磁导率的频率区域。本文所提出的设计方法和新结构对于设计新型左手材料结构

具有很好的指导意义和参考价值。

参考文献:

- [1] Veselago V G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi [J]. 1968, 10:509 - 514.
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47:2075 - 2084.
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity [J]. Physical Review Letters, 2000, 84:4184 - 4187.
- [4] Liu R P, Degiron A, Mock J J, et al. Negative Index Material Composed of Electric and Magnetic Resonators[R]. Applied Physics Letters 2007 - 90 - 263504, 2007.
- [5] 王甲富, 屈绍波, 徐卓, 等. 磁谐振和电谐振结构构成的左手材料的设计[J]. 物理学报, 2008, 57. WANG Jiafu, QU Shaobo, XU Zhuo, et al. The Design of Left - handed Metamaterials Composed of Magnetic Resonators and Electric Resonators. Acta. Phys. Sin., 2008, 57 (in Chinese).
- [6] Marques R, Medina F, Rafii - El - Edrissi R. Role of Bianisotropy in Negative Permeability and Left - handed Metamaterials [J]. Physical Review B, 2002, 65:144440.
- [7] Sauviac B, Simovski C R, Tretyakov S A. Double Split - ring Resonators: Analytical Modeling and Numerical Simulations [J]. Electromagnetics, 2004, 24:317 - 228.
- [8] Baena J D, Marques R, Medina F. Artificial Magnetic Metamaterial Design by Spiral Resonators[R]. Physical Review B 2004 - 69 - 014402.
- [9] Padilla W J, Arosso M T, Highstrete C, et al. Electrically Resonant Terahertz Metamaterials: Theoretical and Experimental Investigations[R]. Physical Review B 2007 - 75 - 041102, 2007.
- [10] Schurig D, Mock J J, Smith D R. Electric - field - coupled Resonators for Negative Permittivity Metamaterials[R]. Applied Physics Letters.
- [11] Chen X D, Grzegorzczak T M, B - I Wu, et al. Robust Method to Retrieve the Constitutive Effective Parameters of Metamaterials [R]. Physical Review E 2004 - 70 - 016608, 2004.
- [12] Smith D R, Schultz S, Markos P, et al. Determination of Effective Permittivity and Permeability of Metamaterials From Reflection and Transmission Coefficients[R]. Phys Rev B 2002 - 65 - 195104, 2002.
- [13] Smith D R, Vier D C, Koschny Th, et al. Soukoulis. Electromagnetic Parameter Retrieval From Inhomogeneous Metamaterials [R]. Physical Review E 2005 - 71 - 036617, 2005.
- [14] Koschny T, Markos P, Smith D R, et al. Soukoulis. Resonant and Antiresonant Frequency Dependence of the Effective Parameters of Metamaterials[R]. Physical Review E 2003 - 68 - 065602, 2003.

(编辑:徐楠楠)

Design of Coupling - enhancement Character - shaped Magnetic Resonator Used in Constructing Left - handed Meta - materials

WANG Jia - fu¹, QU Shao - bo^{1,2}, XU Zhuo², MA Hua¹, YANG Yi - ming¹, GU Chao¹

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Left - handed meta - materials can be fabricated by combining electric resonators with magnetic resonators to realize simultaneously negative permeability and permittivity, so the design of magnetic resonators is of great importance in designing new types of left - handed meta - materials. Dealing with the design of magnetic resonators, the design principle of magnetic resonators is proposed. The structure of the magnetic resonator must be equivalent to a mirror - symmetrical single loop in order to eliminate the unwanted bi - anisotropy. Based on the design principle, a coupling - enhancement magnetic resonator structure is devised. The negative permeability of the structure is verified by experimental simulations. The results show that the permeability of the structure is negative in 8.9GHz ~ 10GHz and that bi - anisotropy is eliminated effectively. Compared with the conventional magnetic resonator SRR, the proposed magnetic resonator is simple in structure and much easier in fabrication and analysis.

Key words: coupling - enhancement; left - handed materials; magnetic resonator